

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO POR INTERMÉDIO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Barros, J.A.O.

Departamento Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Azurém, 4800 Guimarães, Tel: 053-510210

SUMÁRIO

Neste trabalho o comportamento em tracção, compressão, flexão e corte do betão reforçado com fibras de aço é caracterizado por intermédio de ensaios experimentais. São referidas aplicações da indústria da construção civil em que o betão reforçado com fibras de aço tem potencial para ser aplicado.

ABSTRACT

In this work the tension, compression, bending and shear behavior of the steel fiber reinforced concrete is assessed performing experimental tests. It is referred applications of the civil construction industry where steel fiber reinforced concrete has potential to be applied.

1 - INTRODUÇÃO

O betão reforçado com fibras de aço (*BRFA*) é um material de matriz cimentícia a cuja composição é adicionada determinada percentagem de fibras. O uso destes compósitos na indústria da construção civil tem vindo a aumentar continuamente, dado que, sem se perder as excelentes características atribuídas ao betão convencional, melhora-se substancialmente os aspectos mais débeis deste material. Assim, tal como os betões convencionais, o *BRFA* continua a ser um material de custos inferiores aos dos seus potenciais concorrentes na indústria da construção civil e apresenta excelentes propriedades de trabalhabilidade e de resistência. Além disto, a fragilidade que caracteriza os betões convencionais é diminuída por intermédio da participação das fibras como elemento de reforço [1].

As fibras atravessando as microfissuras, que sempre existem nos materiais de matriz cimentícia, oferecem uma resistência suplementar à degeneração destas em macrofendas, dado que será necessário dispendir energia adicional para fazer deslizar as fibras relativamente à matriz envolvente (ou para provocar a cedência das fibras, que não é contudo conveniente como se verificará na próxima secção). Assim, desde que a composição e as técnicas de amassadura e de aplicação do *BRFA* sejam adequadas, verifica-se que a capacidade de absorção de energia do material, a sua resistência às acções de fadiga e de impacto aumentam consideravelmente com a percentagem de fibras na mistura [2 – 5]. O controlo da fendilhação é também significativamente melhorado [6]. No que se refere à resistência sob acções estáticas, verifica-se a ocorrência de reduzidos aumentos com o reforço das fibras [1,3]. Contudo, mesmo sob acções estáticas, a maior capacidade de absorção de energia do material proporcionada pelo reforço das fibras, permite que a capacidade de carga de elementos estruturais aumente significativamente com a percentagem de fibras [6].

As aplicações que mobilizem em maior grau a capacidade de absorção de energia do material serão as mais adequadas para serem realizadas com betão reforçado com fibras. Se, além disto, as fibras substituírem a armadura convencional, poder-se-á obter uma economia

considerável na solução a adoptar. Assim, os pavimentos térreos de edifícios industriais [1,7,8] e as paredes de túneis [9] são exemplos por excelência do adequado uso dos *BRFA*. A substituição parcial de armadura convencional, principalmente da de resistência ao esforço transversal, é também exemplo de aplicação do *BRFA* [10]. Os nós de pórticos são zonas crónicas de dano devido a acções sísmicas intensas [11,12]. A resistência destas zonas, e principalmente a sua ductilidade, podem ser substancialmente aumentadas se se aplicar uma adequada percentagem de fibras de aço. Se em zonas como estas, em que é usual ocorrer congestionamento de armaduras de resistência ao esforço transversal, as fibras substituírem eficazmente, pelo menos alguma percentagem destas armaduras, as condições de betonagem podem melhorar, o que aumentará a qualidade do betão aplicado nestas zonas. Nos últimos anos tem-se assistido ao reforço de betões de elevada resistência com fibras de aço, dado que a diminuição da ductilidade que ocorre com o aumento da resistência do betão pode ser superada pela ductilidade introduzida pelo reforço das fibras [13].

2 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS E SEUS MECANISMOS DE REFORÇO

As fibras metálicas, de vidro, plásticas e as de materiais naturais são as que se utilizam correntemente no reforço de materiais de matriz cimentícia. As fibras mais utilizadas nas aplicações estruturais da indústria da construção civil são as fibras metálicas, principalmente as de aço. Neste trabalho apenas serão tratados os betões reforçados com fibras de aço. As fibras podem apresentar-se com formas geométricas diversas e com superfícies de propriedades diferentes. As fibras de aço com designação comercial *Dramix* são das mais utilizadas em elementos estruturais, dado que apresentam-se com extremidades dobradas que lhes confere elevado poder de fixação à matriz envolvente. Além disto, apresentam-se agrupadas em pentes de algumas dezenas de fibras, por intermédio de uma cola que se dissolve na água da amassadura, o que melhora as propriedades de trabalhabilidade da mistura.

Além da forma e material constitutivo, as restantes principais características das fibras são o seu comprimento, l_f , o seu diâmetro d_f , a sua esbelteza, l_f/d_f , a sua percentagem volumétrica na mistura, V_f , a sua resistência à tracção, σ_{fu} , e a sua aderência à matriz envolvente, τ_{fu} . Desde que assegurada a trabalhabilidade necessária da mistura, as propriedades mecânicas dum material de matriz cimentícia melhoram com o aumento da percentagem e esbelteza das fibras. Contudo, verifica-se que com o aumento destas características das fibras a trabalhabilidade da mistura diminui, pelo que a composição do compósito tem que ser aferida para os objectivos em vista.

Dos diversos ensaios experimentais realizados com *BRFA* constata-se que a principal propriedade beneficiada pela participação das fibras é o aumento da capacidade de absorção de energia do material. Assim, deve-se evitar que as fibras que atravessam as fendas do betão cedam pela sua rotura, dado que tal ocorrência impediria o desenvolvimento do referido benefício. A composição do *BRFA* deve ser tal que promova o deslizamento das fibras relativamente à matriz envolvente. Assim, quanto mais resistente for a matriz envolvente, maior é a resistência de aderência das fibras à matriz envolvente, pelo que maior será a resistência da fibra ao seu arranque da matriz, devendo a esbelteza das fibras diminuir, por forma a que não ocorra rotura pela cedência das fibras.

As fibras que se utilizam correntemente têm um comprimento superior à maior dimensão dos inertes graúdos, pelo que o seu reforço é de carácter estrutural, dado que é activado somente após a fendilhação da matriz. Assim, a carga de início da fendilhação não é significativamente alterada pela participação das fibras. Somente o será se se utilizar microfibras que atravessam as microfendas (ver Figura 1). Neste caso, as microfibras “cozendo” as microfendas que se distribuem aleatoriamente no seio do material, aumentam a amplitude da fase de comportamento em regime elástico do material.

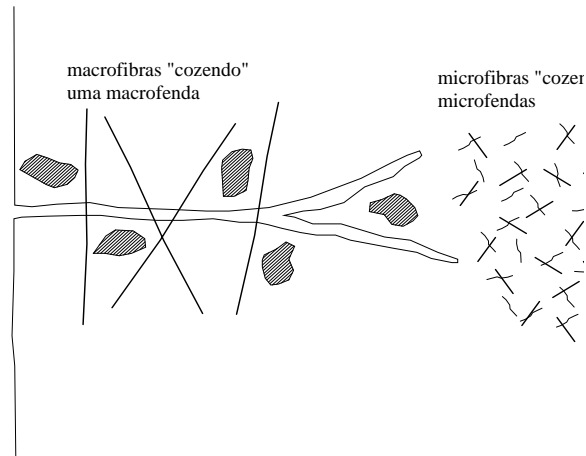


Figura 1 - Papel das fibras no controlo da fendilhação.

3 - FABRICAÇÃO

3.1 - Composições

A definição da composição dum *BRFA* é, ainda, um processo essencialmente experimental. É conveniente ajustar a composição ao processo de colocação em obra e à resistência a alcançar.

A maior parte da metodologia convencional de fabricação e de aplicação dos betões simples, (*BS*), entendidos como não incluindo qualquer tipo de reforço, é aplicável aos betões reforçados com fibras, com pequenas adaptações. Para que as fibras sejam eficazes em termos de reforço é necessário que se impeça a sua aglomeração durante o processo de amassadura da mistura [14]. A aglomeração das fibras está relacionada com a esbelteza das fibras e sua percentagem, com o tamanho e percentagem dos inertes, com a composição granulométrica da mistura, com a razão água-cimento e com o método de amassadura. O aumento da esbelteza e da percentagem de fibras, tamanho e quantidade de inertes graúdos intensifica a tendência para a aglomeração das fibras, diminuindo a trabalhabilidade da mistura [14]. Caso se pretenda aumentar a percentagem de fibras sem comprometer a trabalhabilidade da mistura será necessário utilizar composições de granulometria mais fina e fibras de menor esbelteza. Contudo, para que as fibras sejam eficazes em termos de reforço estrutural têm que ter um comprimento superior a duas vezes a maior dimensão dos inertes mais graúdos (d_{max}). Assim, as características da composição devem atender ao compromisso entre a trabalhabilidade desejada e as propriedades mecânicas requeridas.

A trabalhabilidade da mistura pode ser aferida por qualquer dos ensaios convencionais [3,15]. Contudo, para betões reforçados com elevada percentagem de fibras o ensaio de abaixamento do cone de Abrams [16] não é adequado para avaliar a trabalhabilidade da mistura, dado que as fibras formam um emaranhamento que limita o escoamento estático da mistura. A avaliação da trabalhabilidade por intermédio de ensaios em que a mistura é vibrada é mais adequada, dado que a vibração diminui a resistência ao corte que a mistura apresenta em repouso. Assim, os ensaios que medem o tempo de fluidez da mistura sob vibração, tais como o ensaio do cone invertido e o “*VB test*”, são mais adequados [17] para os *BRFA*. Todavia, o ensaio do cone invertido só deve ser aplicado a misturas que apresentem um abaixamento (“*slump*”) inferior a 100 mm e o “*VB test*” é de difícil utilização em obra. O

ensaio deve ainda mobilizar um volume representativo de betão, pelo que o “*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*” preconiza a utilização do “*maniabilimètre LCL*” [10].

Composições típicas de betão reforçado com fibras de aço são apresentadas no Quadro 1. Consta-se que se aplica um pouco mais de cimento e de inertes finos comparativamente com composições de *BS*.

Quadro 1 - Composições típicas para o betão de resistência normal reforçado com fibras de aço [1,3].

		Argamassa	Betão com inertes de dimensão máxima de	
			10 mm	20 mm
Cimento (Kg/m ³)		400 a 700	350 a 600	300 a 550
Água/Cimento		0.30 a 0.45	0.35 a 0.45	0.40 a 0.50
inertes finos/inertes graúdos (%)		100	45 a 60	45 a 55
Aditivo introdutor de ar (%)		7 a 10	4 a 7	4 a 6
Volume de fibras de aço (%)	deformadas	0.5 a 1.0	0.4 a 0.9	0.3 a 0.8
	lisas	1.0 a 2.0	0.9 a 1.8	0.8 a 1.6

É normal utilizar-se também aditivos tais como pozolanas, escórias, cinzas volantes e outros plastificantes redutores de água, dado que permitem diminuir a percentagem de água e, consequentemente, aumentar a resistência do compósito, sem prejuízo da trabalhabilidade da mistura [18,19].

Um caderno de encargos relativo aos *BRFA* deve especificar o seguinte:

- tipo e quantidade de fibras (que deve ter em conta o comportamento mecânico desejado, principalmente à tracção);
- máxima dimensão dos inertes mais graúdos, obtida da relação $d_{\max} < l_f / 2$ (com um d_{\max} o maior possível por razões económicas e de compacidade da mistura);
- resistência à compressão aos 28 dias;
- trabalhabilidade (tempo de escoamento da mistura) correspondente à aplicação vizada.

O procedimento de definição duma composição de *BRFA* que se descreve em seguida é o preconizado pela escola francesa [10]:

- obtenção de uma composição de betão simples que desenvolva uma resistência 10% superior à prescrita no caderno de encargos e que desenvolva uma trabalhabilidade adequada (utilizando eventualmente um superplastificante para este fim), fixando-se uma relação areia/brita (*ar/br*) aproximadamente igual a 1;
- fabricação de uma quantidade de *BRFA* representativa da estrutura a realizar, ajustando a quantidade de superplastificante de forma a que a trabalhabilidade possa ser aferida por um ensaio que recorra à vibração da mistura.

- fabricação de cerca de cinco misturas, variando a relação $ar/(ar+br)$ por incrementos de 0.1, por forma a cercar o ponto de trabalhabilidade óptima (ver Figura 2);
- ajustamento da quantidade de pasta de cimento ou de superplastificante para obter a trabalhabilidade desejada;
- verificação da resistência e eventual ajustamento da relação água/cimento.

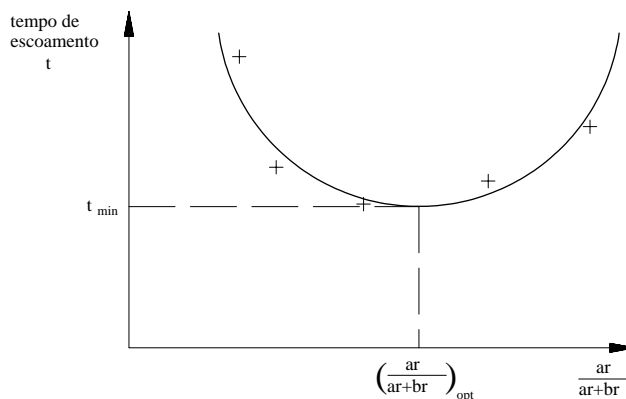


Figura 2 - Processo de obtenção da compacidade óptima num *BRFA* [10].

3.2 - Técnicas de amassadura e de aplicação

As técnicas de amassadura poderão variar consoante o tipo de fibra a usar e as quantidades de betão a fabricar. O importante é assegurar-se uma boa dispersão das fibras, pelo que o tempo de amassadura é, normalmente, superior ao dispendido na amassadura de betões simples. Para os betões reforçados com fibras de aço o procedimento mais utilizado é o que se segue:

- misturar os materiais a seco (sem fibras);
- acrescentar a água (com 1/3 da quantidade total do superplastificante);
- acrescentar as fibras e o resto do superplastificante.

Devido ao maior atrito interno das misturas de *BRFA*, não se deve exceder os 80% da capacidade da betoneira.

Para grandes quantidades de betão pode-se recorrer à tecnologia do betão pronto transportado em autobetoneiras. As fibras são adicionadas ao betão pronto introduzindo-as na autobetoneira pouco antes da aplicação do *BRFA*. Sempre que tal seja possível, as fibras devem ser introduzidas na autobetoneira por intermédio de passadeiras rolantes, dado que estas facilitam a separação das fibras. Se no estaleiro da obra não estiverem disponíveis passadeiras rolantes, as fibras podem ser introduzidas na autobetoneira por meio do despejo de sacos de fibras. Em qualquer das técnicas a autobetoneira deve rodar na sua máxima velocidade durante a inserção das fibras, não se devendo introduzir mais do que 45 Kg de fibras por minuto. Após a adição das fibras o tambor da autobetoneira deve rodar durante mais 50 rotações à velocidade normal [3].

Para elevadas quantidades de *BRFA* recomenda-se que sejam realizadas algumas composições com diferentes metodologias de amassadura e determinar as suas propriedades, de forma a afinar o processo de amassadura indicado aos objectivos requeridos.

O processo de aplicação do *BRFA* tem também muita influência nas propriedades mecânicas deste compósito, dado que as fibras têm tendência a se orientar ortogonalmente à direcção de betonagem e de compactação. As paredes da cofragem e, sobretudo, o escoamento do betão orientam as fibras segundo direcções preferenciais, o que introduz anisotropia, quer do ponto de vista das constantes elásticas do compósito, quer do comportamento à rotura. A queda do betão de alturas consideráveis e o uso de vibrações fortes e excessivamente prolongados favorecem a aglomeração das fibras, prejudicando as propriedades do compósito.

4 - COMPORTAMENTO À TRACÇÃO

O ensaio de tracção uniaxial é aquele que melhor permite caracterizar os benefícios proporcionados pelo reforço das fibras. A determinação da resistência à tracção por intermédio de ensaios de tracção indirecta ou de ensaios de flexão fica descaracterizada por efeitos de escala estrutural [10]. O comportamento à tracção do *BRFA* depende consideravelmente do método de fabrico deste compósito [10]. Assim, os ensaios de tracção uniaxial devem ter em conta o método de aplicação do compósito em obra e a direcção das solicitações principais na estrutura, por forma a que o diagrama que se obtenha seja o mais representativo possível do comportamento que o material terá na estrutura real. Quanto mais eficaz for o método em termos de dispor a maior percentagem de fibras segundo a direcção das tensões de tracção, melhor será o comportamento em tracção do compósito. Na Figura 3 apresenta-se a relação tensão-abertura de fenda obtida em ensaios com provetes cortados e solicitados na mesma direcção da de betonagem (horizontal), na direcção ortogonal (vertical) e numa direcção inclinada (diagonal), permitindo confirmar a anisotropia do material. O comportamento pós-fissuração é o mais alterado pela participação das fibras. Este comportamento depende da percentagem de fibras, da sua orientação e modo de funcionamento.

Dos resultados obtidos nos ensaios de tracção efectuados com *BRFA* verifica-se que, apesar do comportamento à tracção melhorar com o aumento da percentagem, esbelteza e capacidade de fixação das fibras à matriz [20], a resistência não aumenta significativamente para percentagens de fibras inferiores a 2% em volume. Tem-se constatado que o aumento da resistência à tracção proporcionado pela participação das fibras é tão mais significativo quanto mais resistente for o betão, dado o aumento da resistência da interface fibra-matriz, que melhora os mecanismos de reforço das fibras. Quanto mais resistente for o betão menos esbeltas terão que ser as fibras, por forma a que as fibras cedam por deslizamento relativamente à matriz e não pela sua rotura, dado que assim se garante o acréscimo de ductilidade que as fibras potenciam. Além disto, quanto mais curtas forem as fibras maior é o seu número no seio do material, o que introduz uma maior homogeneidade em termos de reforço. Como consequência, verifica-se uma menor dispersão do comportamento do material, que conduz a resistências características mais elevadas, conforme se constata analisando os diagramas representados na Figura 4.

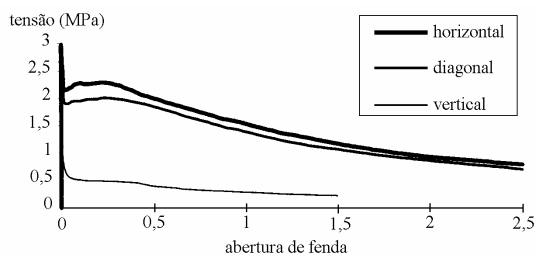


Figura 3 - Influência no comportamento em tracção da orientação de corte dos provetes em relação à direcção de betonagem [10].

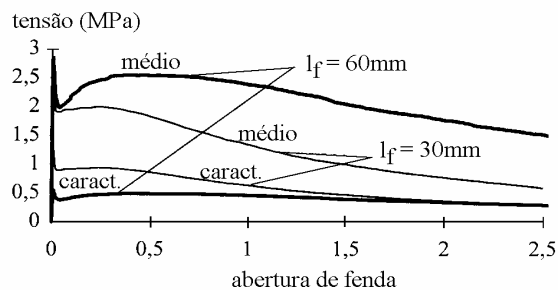


Figura 4 - Diagramas médios e característicos tensão de tracção-abertura de fenda em provetes de betão de $f_{cm} = 40\text{ MPa}$ e reforçados com fibras de 30 mm e 60 mm de comprimento [10].

5 - COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos em ensaios de compressão uniaxial têm revelado que, para as percentagens de fibras correntemente aplicadas na prática, a resistência, f_{cm} , e o módulo de elasticidade tangente, E_{ci} , não variam significativamente. A extensão sob o pico da carga, ε_{c1} , aumenta ligeiramente com a percentagem e com a esbelteza das fibras, enquanto a capacidade do material para absorver energia após o pico de carga aumenta consideravelmente com o aumento destas características das fibras [6].

Tem-se constatado que se as fibras se orientarem preferencialmente na direcção ortogonal à direcção de solicitação, a fendilhação é mais eficazmente contida, o que proporciona maiores melhorias no comportamento à compressão do que no caso das fibras se orientarem preferencialmente na mesma direcção da de solicitação. Neste último caso pode-se mesmo registar uma diminuição da resistência do compósito.

Várias relações empíricas têm sido propostas para simular o comportamento à compressão uniaxial do betão simples, enquanto para o *BRFA* são escassas as expressões avançadas [3]. O código modelo *CEB-FIP* de 1990 [22] propõe a lei cujo diagrama se representa no interior da Figura 5. Nesta Figura inclui-se ainda os diagramas tensão-extensão ($\sigma_c - \varepsilon_c$) obtidos em alguns dos ensaios de compressão uniaxial efectuados com provetes de *BRFA*, assim como o diagrama previsto com a lei do código modelo *CEB-FIP* de 1990. Constata-se que a lei proposta neste código não é a mais apropriada para simular o comportamento à compressão uniaxial destes compósitos, dado não ser capaz de simular a maior ductilidade pós-pico que se verifica nos *BRFA*.

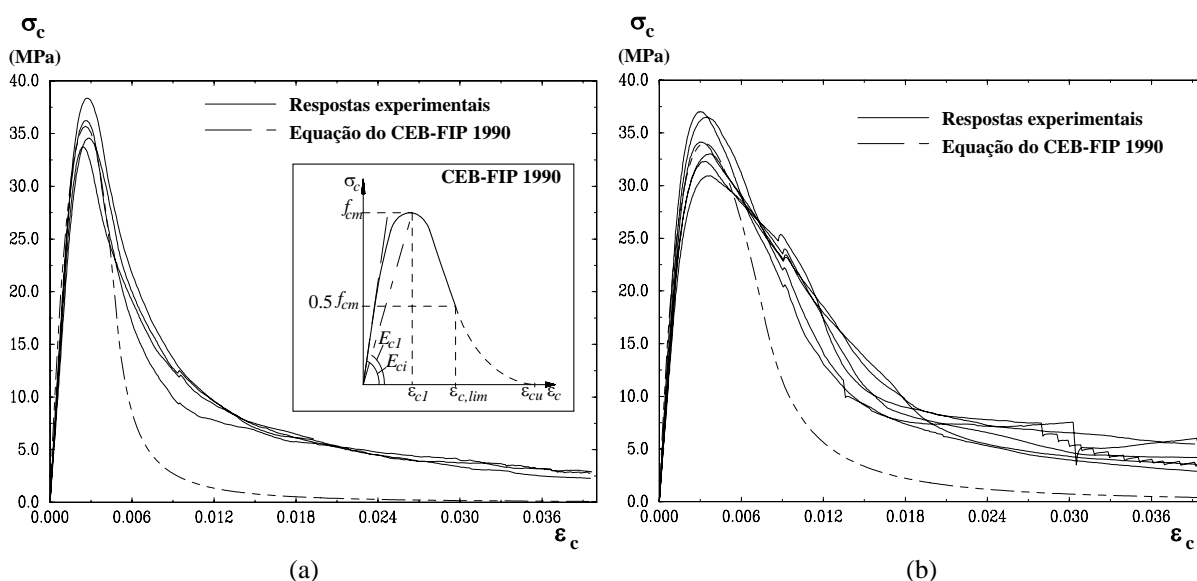


Figure 5 - Diagramas tensão-extensão de compressão em provetes de *BRFA* reforçados com 30 Kg/m³ de fibras ZP30/.50 (a) e 60 Kg/m³ de fibras ZX60/.80 (b).

Devido a este facto, para os betões reforçados com fibras de aço ZP30/.50 ($l_f = 30mm$ e $d_f = 0.5mm$) e ZX60/.80 ($l_f = 60mm$ e $d_f = 0.8mm$) é proposta a seguinte expressão [6]:

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}{\frac{E_{c1}}{E_{ci}} + \left(1 - p - \frac{E_{c1}}{E_{ci}}\right) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right) + p \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^{\frac{p + \frac{E_{c1}}{E_{ci}}}{p}}} \quad (1)$$

em que ε_c é a extensão correspondente à tensão σ_c , E_{ci} e $E_{c1} = f_{cm}/\varepsilon_{c1}$ são o módulo de elasticidade tangente e secante e p é um parâmetro que deverá depender das principais características das fibras. Com base nos resultados obtidos nos ensaios experimentais e utilizando-se o método dos mínimos quadrados obteve-se as seguintes expressões [6]:

$$f_{cm} = 36.26250 + 5.16992W_f - 0.72506W_f^2 - 0.52025W_f^3, \quad (2a)$$

$$\varepsilon_{c1} = 1e - 03 \left(2.49286 + 2.04730W_f - 2.13355W_f^2 + 0.54871W_f^3 \right), \quad (2b)$$

$$p = -0.9291 + 1.56292W_f - 0.38051W_f^2 \quad (2c)$$

para os betões reforçados com fibras ZP30/.50, e

$$f_{cm} = 36.3000 - 5.70964W_f + 6.48890W_f^2 - 1.83135W_f^3, \quad (3a)$$

$$\varepsilon_{c1} = 1e - 03 \left(2.49286 + 0.26068W_f - 2.6962W_f^2 + 0.12163W_f^3 \right), \quad (3b)$$

$$p = 0.30603 + 0.24877W_f - 0.07487W_f^2 \quad (3c)$$

para os betões reforçados com fibras ZX60/.80, em que W_f é a percentagem em peso de fibras na mistura. Na Figura 6 compara-se alguns dos diagramas $\sigma_c - \varepsilon_c$ obtidos experimentalmente com o obtido com o presente modelo, donde se pode concluir do bom desempenho deste.

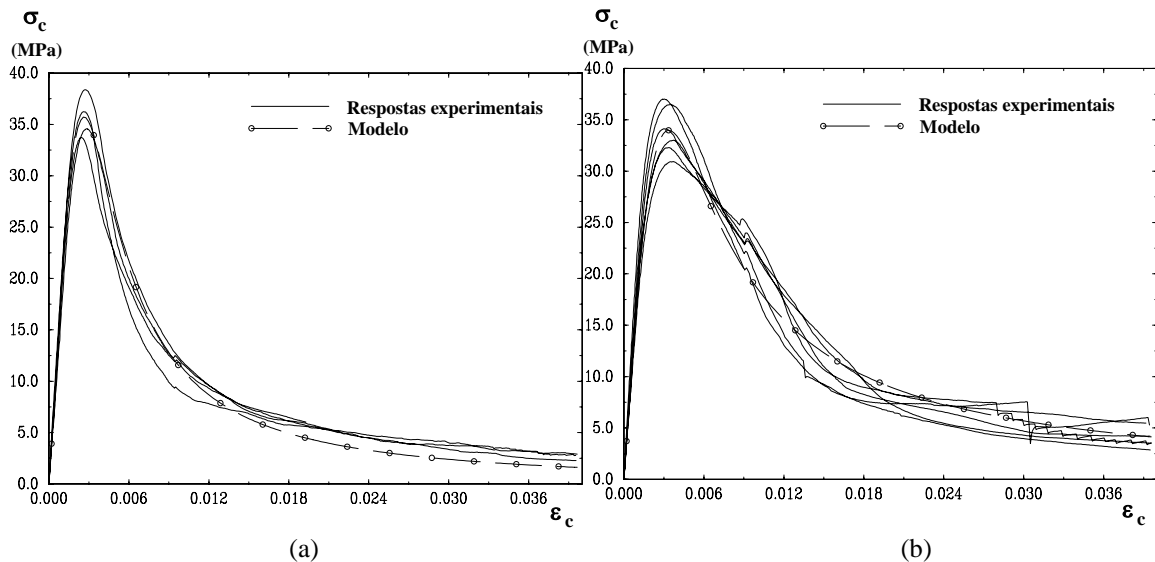


Figura 6 - Diagramas tensão-extensão de compressão obtidos em ensaios experimentais e com o modelo proposto. Provetes reforçados com 30 (a) e 60 (b) Kg/m³ de fibras ZX60/.80.

Na prática, o f_{cm} é usualmente o único parâmetro material determinado experimentalmente. Para um determinado f_{cm} , o correspondente E_{ci} pode ser obtido a partir das recomendações

prescritas no código modelo *CEB-FIP 1990*. Assim, para f_{cm} variando entre 30 a 50 MPa e para percentagens em peso de fibras variando de 1% a 2.5%, os valores de ε_{c1} (e consequentemente E_{c1} dado que $E_{c1} = f_{cm}/\varepsilon_{c1}$) e p podem ser determinados por intermédio das expressões (2) e (3). Contudo, dada a elevada dispersão de valores obtidos nos ensaios experimentais, deverão ser efectuados mais testes para calibrar as referidas expressões.

6 - COMPORTAMENTO À FLEXÃO

A maior parte dos ensaios de flexão revelam que a resistência à flexão, ou mais precisamente, a tensão de tracção em flexão, não aumenta significativamente em betões reforçados com quantidades de fibras de aço inferiores a 60 Kg/m³ [21], conforme se pode constatar na Figura 7. Nestes casos, somente o comportamento pós pico é beneficiado devido à maior capacidade de absorção de energia do material. Para quantidades de fibras superiores a 60 Kg/m³, o aumento da resistência à flexão já não é desprezável, sendo tanto maior quanto mais elevada for a esbelteza das fibras e melhores forem as propriedades de fixação das fibras à matriz envolvente. Contudo, a tensão de início da fendilhação é praticamente insensível à participação das fibras.

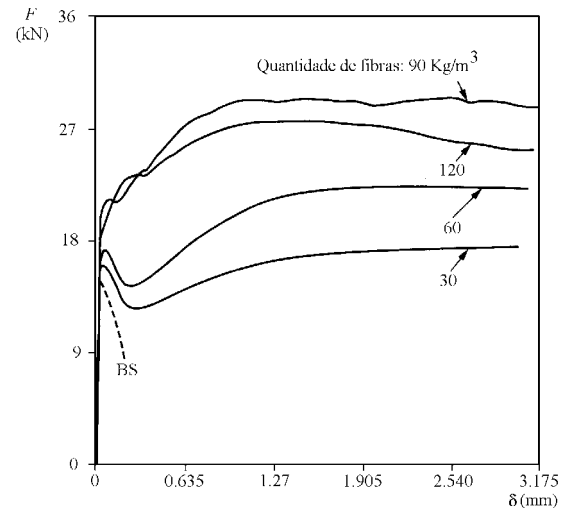


Figura 7 - Influência da quantidade de fibras na relação carga-flecha registada em ensaios de flexão sob três pontos de carga em de *BRFA* [3].

Em termos práticos o benefício proporcionado pelo reforço das fibras pode ser contabilizado no cálculo orgânico das secções dos elementos estruturais. Para esse efeito considere-se que o diagrama tensão-extensão representado na Figura 8 modela, de forma simplificada, o comportamento à compressão e à tracção dos betões. Para os betões reforçados com percentagens de fibras correntemente utilizadas a resistência à tracção, f_t , não varia significativamente e $f_c/f_t \cong 10$. A variável $\sigma_{tf} = f_t/k$ traduz a tensão de tracção retida pelo betão fendilhado, sendo usualmente denominada de resistência residual. O valor do parâmetro k diminui com o aumento do reforço das fibras (percentagem, esbelteza e número de fibras ortogonais à secção de fractura). O valor de σ_{tf} deve ser obtido por intermédio do diagrama característico tensão de tracção-abertura de fenda (ver Figura 9), o que exige que se realize um número suficientemente elevado de ensaios de tracção uniaxial. σ_{tf} deve corresponder à máxima abertura de fenda admissível, w_{ad} , (ver Figura 9), que por sua vez deve estar relacionada com a resistência do compósito à agressividade do meio ambiente e a aspectos estéticos.

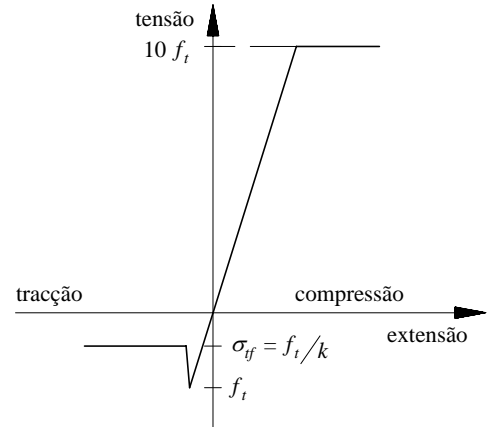


Figura 8 - Modelação simplificada do comportamento à compressão e à tracção dos betões.

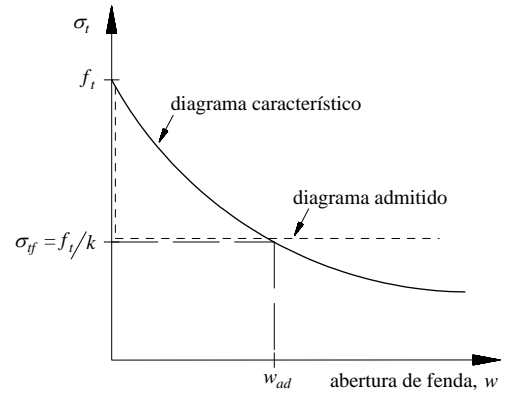


Figura 9 - Determinação da resistência residual por intermédio de um diagrama característico tensão de tracção-abertura de fenda.

Admitindo que numa secção rectangular se desenvolve o diagrama simplificado tensão-extensão representado na Figura 10, obtém-se o seguinte momento na secção fendilhada (M_f):

$$M_f = \frac{bh^2}{2} \frac{f_t}{k} \left[\frac{100k^2 + 10k}{100k^2 + 20k + 1} \right]. \quad (4)$$

Sendo $M_e = \frac{bh^2}{6} f_t$ o momento na secção não fendilhada (comportamento elástico do material), a relação M_f/M_e varia em função do parâmetro k da seguinte forma:

$$k = 3 \Rightarrow \frac{M_f}{M_e} \cong 0.97; \quad k = 2 \Rightarrow \frac{M_f}{M_e} \cong 1.43; \quad k = 1 \Rightarrow \frac{M_f}{M_e} \cong 2.73, \quad (5)$$

o que significa que para $k < 3$ o comportamento do material passa a ser dúctil. Assim, para se assegurar um comportamento dúctil será necessário que o compósito desenvolva uma resistência residual superior a $f_t/3$ para a abertura admissível de fenda.

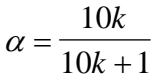


Figura 10 - Diagrama de distribuição de tensões numa secção de barra de *BRFA*.

Dado que a maior parte dos laboratórios não estão equipados por forma a se poder efectuar ensaios de tracção uniaxial completos, tem-se utilizado a seguinte relação:

$$\sigma_{if} = \eta_\theta \eta_l \eta_b 2\tau_{fu} \frac{l_f}{d_f} V_f \quad (6)$$

para determinar a resistência residual dos *BRFA*. Nesta expressão η_θ , η_l e η_b são coeficientes que atendem à orientação, comprimento e propriedades de aderência das fibras [6], tendo as restantes variáveis significado já conhecido. A expressão (6), ao não depender da abertura da fenda, não permite atender ao fenómeno de escala intrínseco à caracterização do comportamento dos materiais por intermédio de ensaios em provetes.

7 - COMPORTAMENTO AO CORTE

O modo de rotura por corte é frágil, sendo por isso de evitar. Para tal utiliza-se correntemente estribos para absorver a maior parte dos esforços de corte instalados, aumentando-se, simultaneamente, a ductilidade do elemento estrutural. Contudo, há situações em que a aplicação de estribos é difícil e onerosa. Zonas de elevada densidade de armadura em que a betonagem é difícil, estruturas de parede delgada em que é laboriosa a colocação de estribos sem dificultar a betonagem e elementos de reduzida altura em que os estribos são pouco eficazes são alguns dos exemplos em que as fibras podem substituir os estribos, pelo menos parcialmente.

A influência das fibras na resistência ao corte tem sido avaliada, fundamentalmente, por intermédio de ensaios em vigas. Na generalidade dos ensaios tem-se constatado que a resistência ao corte aumenta com a percentagem e esbelteza das fibras e com o melhoramento das suas propriedades de aderência e fixação à matriz envolvente [10,23–25]. O aumento da resistência ao corte com a participação das fibras deve-se, fundamentalmente, à maior resistência à tracção do *BRFA* fendilhado. As fibras aumentam ainda a resistência ao deslizamento entre as bielas de betão comprimido que se formam nas vigas, aumentam a resistência ao corte das armaduras longitudinais de tracção (efeito de cavilha) introduzem uma resistência acrescida à encurvadura das armaduras longitudinais de compressão e aumentam a ductilidade e integridade do betão comprimido [26]. Estes efeitos das fibras contribuem para o aumento da resistência ao corte.

No que se refere à possível substituição de estribos por fibras em estruturas submetidas a esforços de corte elevados, verifica-se que a total substituição não é econômica, dado que tal só é possível a expensas de elevada percentagem de fibras. A impossibilidade das fibras

substituírem integralmente as armaduras convencionais de resistência ao esforço transversal de forma economicamente rentável acentua-se com a altura dos elementos estruturais e com a menor resistência do betão que as constitui. Na Figura 11 apresenta-se a relação carga-deslocamento vertical a meio vão, $P - \delta_{mv}$, registada em vigas simplesmente apoiadas reforçadas com 30 (V_{30}), 40 (V_{40}) e 50 (V_{50}) Kg/m^3 de fibras de aço ZP30/.50 [6]. O betão destas vigas apresentou uma resistência média de cerca de 30 MPa aos 28 dias. Nesta figura inclui-se ainda a relação $P - \delta_{mv}$ obtida em viga reforçada com uma percentagem de estribos, ρ_t , de 0.15% (V_{015}) e em viga reforçada com $\rho_t = 0.48\%$ (V_{048}) de estribos de 3 mm de diâmetro com tensão de cedência (f_{sy}) de 175 MPa e tensão de rotura (f_{su}) de 288 MPa. A armadura longitudinal era constituída por 3 varões de 8 mm de diâmetro com $f_{sy} = 545$ MPa e $f_{su} = 708$ MPa. A carga média de rotura das vigas reforçadas com 30, 40 e 50 Kg/m^3 de fibras foi de 26.6 kN, 28 kN e 29.4 kN, enquanto as vigas reforçadas com 0.15% e 0.48% de estribos apresentaram uma carga de rotura de 26.6 kN e 31.5 kN.

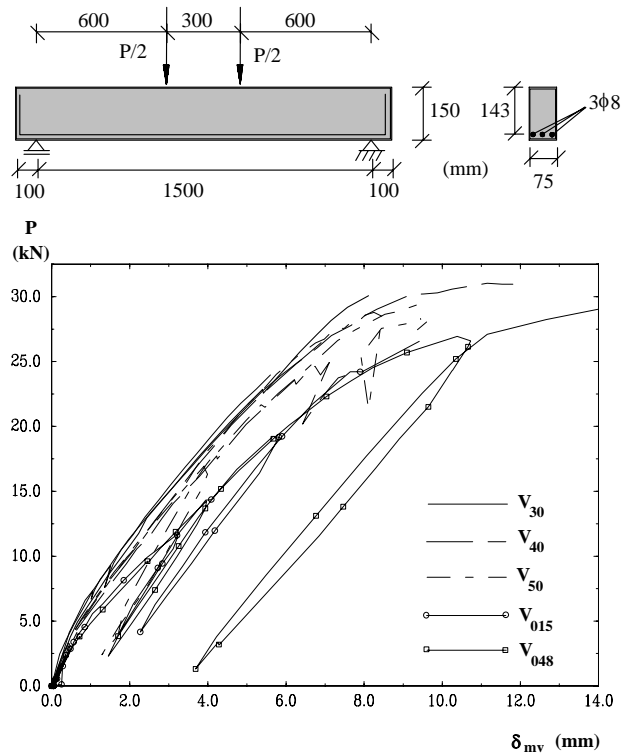


Figura 11 - Curvas carga-deslocamento a meio vão, de vigas de BRFA e de duas vigas estribadas de idênticas características geométricas e mecânicas, mas sem fibras.

Assim, constata-se que o aumento da capacidade de carga não foi significativo com o aumento da percentagem de fibras. Para as percentagens de fibras utilizadas, o modo de rotura também não foi significativamente alterado, tendo ocorrido rotura frágil por corte. O principal benefício proporcionado pelo reforço das fibras, nestes casos, foi a diminuição da deformabilidade, conforme se constata na Figura 11.

Casanova [10] efectuou recentemente uma série de ensaios em vigas de grande porte de secção em T (ver Figura 12). Todas as vigas possuíam a mesma percentagem de armadura longitudinal, constituída por 8 varões de 40 mm de diâmetro com uma resistência de 580 MPa aos 0.2% de extensão e 650 MPa à rotura (HA500).

A série era constituída por uma viga sem qualquer armadura de resistência ao esforço transverso, *BS*, uma viga reforçada com uma percentagem $\rho_t = 0.8\%$ de estribos HA500 ($\phi 10$ af. 0.13 m), *BA1*, viga reforçada com uma percentagem $\rho_t = 0.21\%$ dos mesmos estribos ($\phi 10$ af. 0.5 m), *BA2*, viga reforçada com 100 Kg/m^3 de fibras de aço *Dramix 60/80*, *BFM1*, e viga reforçada com 100 Kg/m^3 de fibras de aço *Dramix 30/50*, *BFM2*. O betão das vigas desta série apresentou uma resistência média de aproximadamente 40 MPa e um módulo de elasticidade de 40 GPa. Na figura 12 apresenta-se os diagramas carga-flecha obtidos nos ensaios efectuados. Verifica-se que o diagrama da viga reforçada com as fibras mais longas, *BFM1*, é próximo do da viga reforçada com $\rho_t = 0.21\%$ de estribos, *BA2*. Casanova verificou ainda que a diferença entre os diagramas carga-flecha das vigas *BFM1* e *BFM2* era semelhante à diferença entre os diagramas tensão de tracção-abertura de fenda obtidos nos respectivos ensaios de tracção uniaxial, o que revela da importância destes ensaios na modelação do comportamento destas estruturas. Este facto foi também confirmado pela análise da evolução dos movimentos das faces das fendas de corte. Assim, verificou-se que a abertura das faces destas fendas era aproximadamente 5 vezes superior ao seu deslizamento tangencial, o que revela que um modelo de simulação do comportamento de vigas passa, fundamentalmente, por uma adequada modelação do comportamento em tracção do compósito.

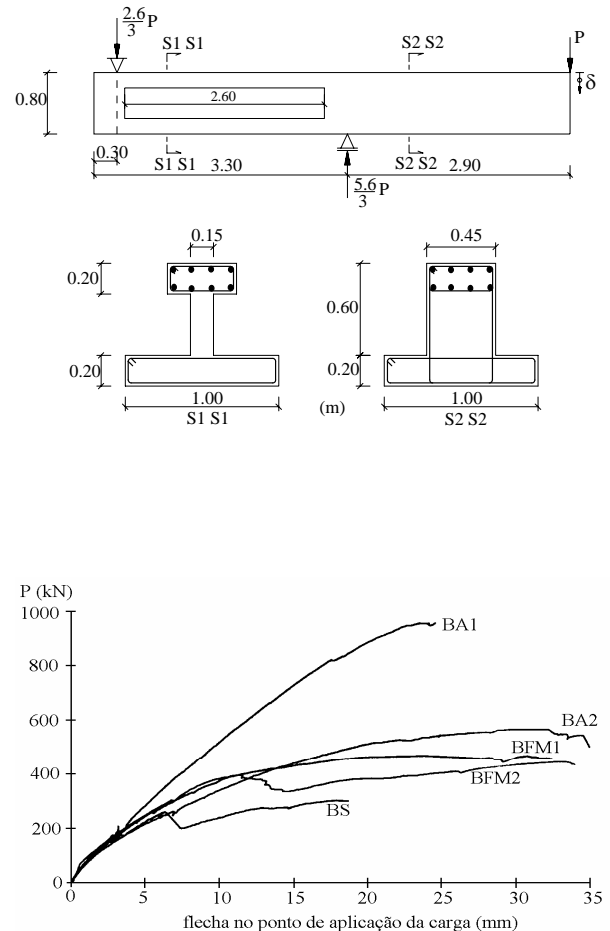


Figura 12 - Carga-flecha nas vigas ensaiadas por Casanova [10].

Casanova [10] efectuou ainda uma outra série de ensaios com vigas simplesmente apoiadas com 2,3 m de vão, de secção rectangular 0.125x0.25 m em betão de elevada resistência (90 MPa aos 28 dias). Todas as vigas desta série tinham a mesma percentagem de armadura longitudinal ($2\phi 25$ na face de tracção e $2\phi 10$ na face de compressão, de aço com resistência de 565 MPa aos 0.2% de extensão e 670 MPa à rotura). Esta série era constituída por duas vigas estribadas, uma com estribos de 8 mm de diâmetro de 490 MPa aos 0.2% de extensão e 600 MPa à rotura, afastados de 0.14 m ($\rho_t = 0.57\%$), *BHPA2*, e outra com estribos do mesmo aço mas afastados de 0.18 m ($\rho_t = 0.44\%$), *BHPA1*, e duas viga reforçadas com 100 Kg/m^3 de fibras de aço *Dramix 30/50*, *BHPFM1* e *BHPFM2*.

Na Figura 13 representa-se a relação carga flecha a meio vão obtida nos ensaios destas vigas. Constata-se que a resposta das vigas reforçadas com fibras é semelhante à das vigas estribadas. A rotura das vigas reforçadas com fibras foi, uma por corte (não violenta) e a outra por esmagamento do betão em compressão, o que foi semelhante ao ocorrido nas vigas armadas com estribos. Verificou-se ainda que para a carga de serviço, a abertura das fendas nas vigas reforçadas com fibras era duas vezes inferior à das vigas estribadas, o que aumenta a durabilidade da estrutura. Tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios efectuados por Casanova, verifica-se que 100 Kg/m^3 (1.25% em volume) de fibras de aço *Dramix 30/50* equivale, em termos de reforço ao esforço transversal, a uma percentagem de 0,5% de estribos (com tensão média de rotura de 600 MPa) mais 0.5% de armaduras longitudinais de compressão.

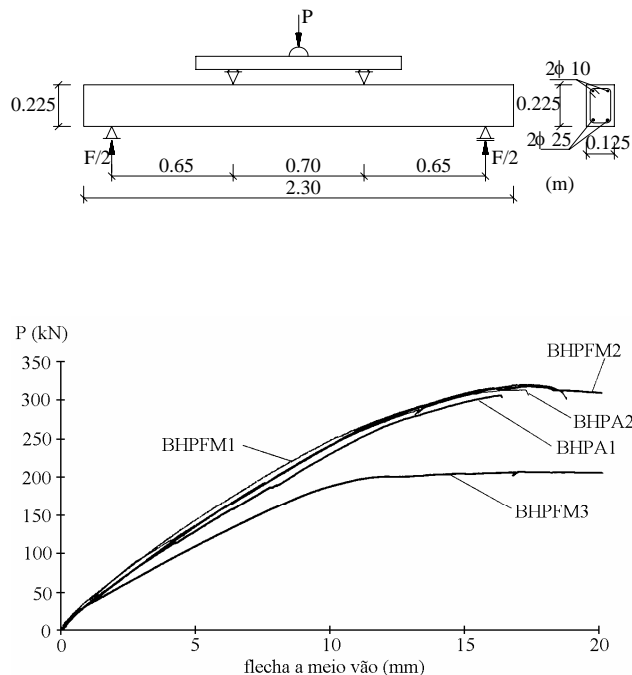


Figura 13 - Diagrama carga-flecha a meio vão em vigas de betão de resistência elevada ($f_{cm} = 90 \text{ MPa}$) [10].

Comparando o desempenho das fibras nas vigas de betão de resistência normal e de resistência elevada conclui-se que é maior nestas últimas. Este facto deve-se à maior resistência residual que o betão de resistência elevada garante para pequena abertura das fendas, graças à maior aderência fibra-matriz nestes betões.

Em vigas realizadas com betões de resistência elevada e reforçadas com armaduras longitudinais de resistência elevada, além do bom desempenho das fibras no que respeita à contribuição para a resistência ao corte, a maior ductilidade dos *BRFA* pode também ser utilizada para se inibir a rotura frágil por esmagamento do betão, aumentar a integridade destes elementos estruturais em fases próximas da rotura e, assim, rentabilizar eficazmente, quer a maior resistência do betão, quer a maior resistência das armaduras longitudinais.

Os ensaios efectuados por Casanova permitem confirmar que a abertura de fenda em estado último depende da altura da viga, sendo a abertura tanto maior quanto mais alta for a viga. Assim, as fibras não podem substituir integralmente os estribos em vigas altas, dado que a resistência residual dos betões reforçados com fibras é somente significativa quando a fenda apresenta reduzida abertura. Contudo, em vigas de altura pequena, principalmente nas realizadas com betão de resistência elevada, as fibras podem substituir integralmente os estribos. Todavia, é necessário avaliar os custos associados às diferentes alternativas, o que só é possível realizando um número significativo de elementos estruturais, contabilizando-se os custos dos materiais, mão-de-obra, tempo de execução e avaliando-se os benefícios acrescidos pelo desempenho estrutural. Segundo conhecimento do autor, este trabalho está por realizar.

Vários modelos têm sido propostos para quantificar a componente de resistência ao esforço transversal garantida pelas fibras. Em quase todos os modelos, às componentes de resistência ao esforço transversal garantidas pelas armaduras transversais e longitudinais e pelo betão comprimido, é adicionada a parcela mobilizada pelas fibras, Q_f . O esforço de

corte retido pelas fibras, Q_f , é calculado pela projecção sobre o eixo vertical do integral da tensão retida pelo *BRFA* ao longo da fissura de rotura por corte, isto é:

$$Q_f = 0.9bd\sigma_{cf}(w_m) \quad (7)$$

em que b e d são a largura e a altura útil da secção do elemento estrutural e $\sigma_{cf}(w_m)$ é a tensão de tracção para a abertura de fenda w_m . Assim, para se determinar Q_f dever-se-ia obter a tensão de tracção para a abertura de fenda correspondente à que a fenda do elemento estrutural apresenta na rotura deste. Este ensaio deveria ser realizado com provetes que apresentem características materiais o mais semelhante possível com as do material da zona em que se desenvolve a fenda de rotura no elemento estrutural. Além disto, a direcção da solicitação neste ensaio deve ser o mais próximo possível da direcção da tensão principal máxima de tracção que se desenvolve nessa zona. Dada a dificuldade em se determinar o valor de w_m , Casanova propôs a seguinte equação empírica [10]:

$$w_m = 0.9d\varepsilon_s \quad (8)$$

em que ε_s pode assumir dois valores: o limite de elasticidade das armaduras longitudinais, ou o valor de 1%, que Casanova considera como sendo o valor regulamentar de plastificação dos aços. Dos resultados obtidos experimentalmente constata-se que w_m deve ser determinado com $\varepsilon_s = 1\%$. Como a equação (7) obriga à determinação de $\sigma_{cf}(w_m)$, o que só pode ser feito por intermédio de um ensaio de tracção uniaxial com controlo de deslocamentos, que requer equipamento não acessível à maior parte dos laboratórios, vários autores sugerem que a quantificação de $\sigma_{cf}(w_m)$ possa ser realizada por intermédio da expressão (6).

Com base no seu modelo, Casanova [10] sugere a seguinte equação de equivalência mecânica entre os *BRFA* e as armaduras de resistência ao corte:

$$\sigma_{cf}(w) = \rho_t \sigma_a \quad (10)$$

em que $\sigma_{cf}(w)$ é a resistência residual que o betão reforçado com fibras deve mobilizar para determinada abertura admissível de fenda, w , e σ_a é a tensão limite de elasticidade do aço dos estribos.

8 - ENSAIOS EM FAIXAS DE LAJE

A influência das fibras de aço no comportamento de estruturas de betão submetidas a flexão foi avaliada por intermédio de ensaios em faixas de laje reforçadas com fibras.

Na Figura 14 inclui-se um esquema representando a geometria da faixa de laje e o carregamento utilizado num ensaio típico. Foi efectuado um conjunto de testes constituído por ensaios em faixas de lajes reforçadas com 30, 45 e 60 Kg/m³ de fibras de aço *Dramix ZP30/.50*. A resistência média dos betões correspondentes a estas faixas de laje foi de 30 MPa aos 28 dias.

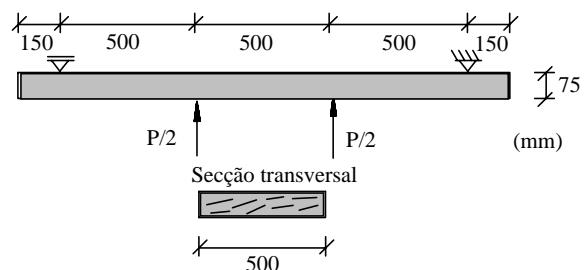


Figura 14 - Geometria e topologia de carregamento das faixas de laje.

Na generalidade destes ensaios apenas se desenvolveu uma única fenda visível à vista desarmada, dado não existir uma percentagem de fibras suficiente para controlar a fendilhação. Na Figura 15 apresenta-se, para todas as faixas de laje ensaiadas, a resposta carga-deslocamento no transdutor de deslocamento (LVDT) mais próximo da fenda de rotura, $P - \delta_{fr}$. Constata-se que, para as quantidades de fibras utilizadas, a capacidade de carga não aumenta significativamente com a percentagem de fibras. O principal benefício proporcionado pela participação das fibras revela-se no comportamento pós-pico, dado que a ductilidade aumenta com a percentagem de fibras.

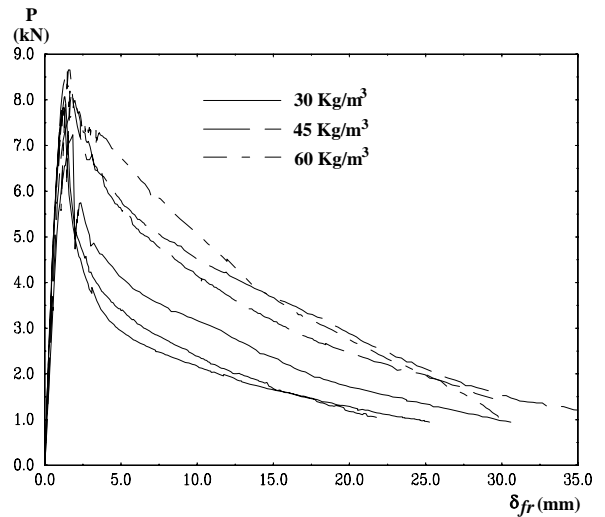


Figura 15 - Diagramas carga-deslocamento no transdutor mais próximo da fenda de rotura.

Foram ainda ensaiadas um conjunto de faixas de laje armadas com rede electrossoldada na face de tracção ($A_s = 40 \text{ mm}^2$ de $f_{sy} = 560 \text{ MPa}$ e $f_{su} = 800 \text{ MPa}$) e reforçadas com 30, 45 e 60 Kg/m^3 de fibras de aço ZX60/.80. A resistência à compressão aos 28 dias variou entre os 52 MPa e os 56 MPa. Na Figura 16 apresenta-se o padrão de fendilhação registado. Constata-se que o afastamento médio entre fendas diminuiu consideravelmente com o aumento da percentagem de fibras.

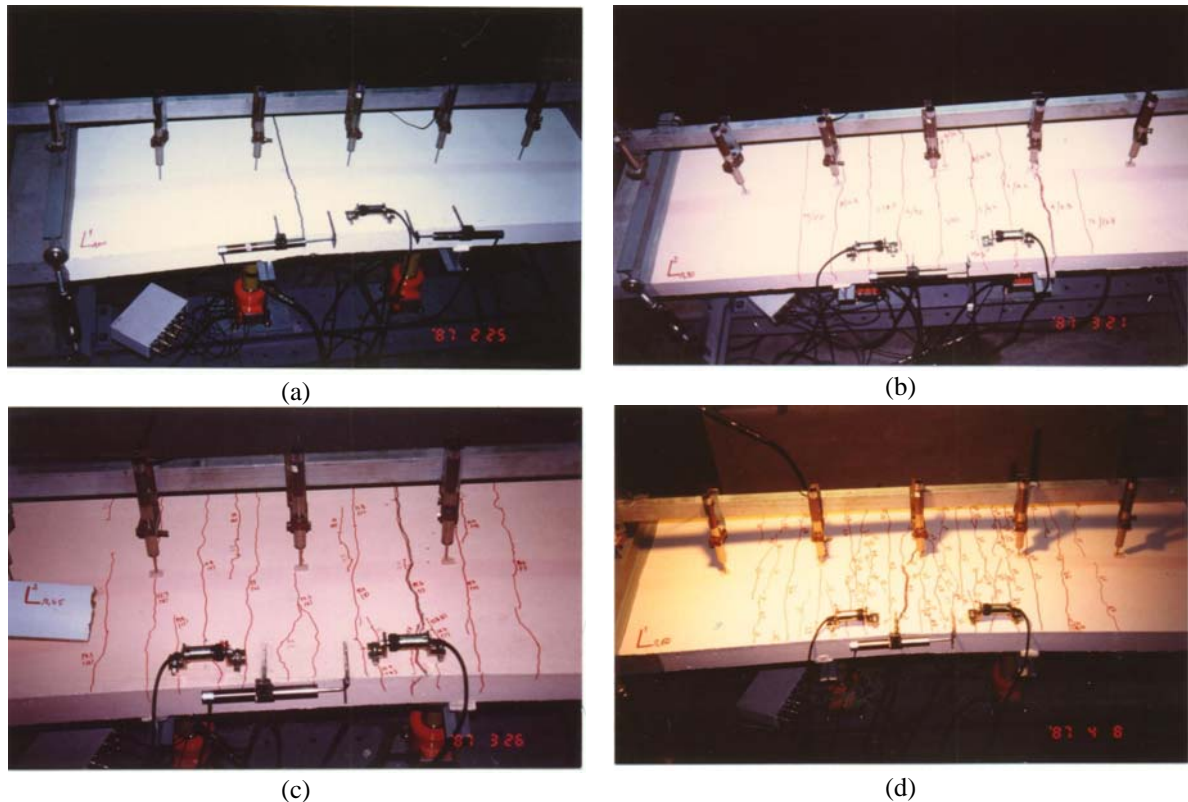


Figura 16 - Padrão de fendilhação em faixas de laje armadas com rede electrossoldada e reforçadas com 0 (a), 30 (b), 45 (c) e 60 Kg/m^3 (d) de fibras ZX60/.80.

Na Figura 17 apresenta-se as curvas carga-deslocamento no transdutor de deslocamentos colocado a meio vão ($P - \delta_{mv}$), para todas as faixas de laje armadas com rede electrossoldada e reforçadas com diferente percentagem de fibras ZX60/.80. Consta-se que a capacidade de carga aumenta consideravelmente com a percentagem de fibras, alcançando um aumento de mais de 100% nas faixas de laje reforçadas com 60 Kg/m³. Pode-se concluir que se trata duma aplicação dos BRFA com bastante interesse, principalmente na pré-fabricação de faixas de lajes simplesmente apoiadas para pisos submetidos a elevadas cargas, como são os casos de pavimentos de silo-autos, centros comerciais, bibliotecas, etc..

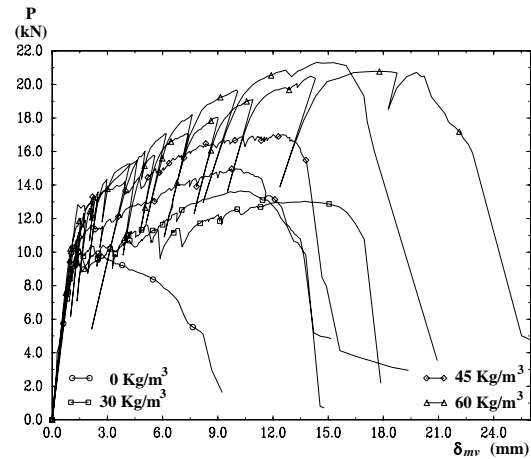


Figura 17 - Curvas carga-deslocamento no transdutor de deslocamentos colocado a meio vão nas faixas de laje armadas e reforçadas com diferente percentagem de fibras ZX60/.80.

9 - COMPORTAMENTO DE LAJES APOIADAS EM SOLO

Os pavimentos industriais são uma aplicação por excelência dos BRFA, dado que durante a sua vida útil são submetidos a acções cíclicas e de impacto que requerem do material uma adequada capacidade de absorção de energia, por forma a garantir o grau de funcionalidade exigido. Com o objectivo de comparar o comportamento estrutural de lajes reforçadas com fibras de aço com o de lajes de betão simples e o de lajes reforçadas com rede electrossoldada, foram efectuados ensaios com este tipo de lajes apoiadas em solo [6]. O plano de investigação experimental foi constituído por duas séries de ensaios, sendo cada série constituída por uma laje reforçada com 30 Kg/m³ de fibras *Dramix ZX60/.80*, por uma laje reforçada com 45 Kg/m³ das mesmas fibras, uma laje armada na face traccionada com rede electrossoldada (duas CQ30 que corresponde a 20 Kg/m³ de aço com $f_{su} = 700$ MPa) e uma laje de (BS).

Na Figura 18 apresenta-se um esquema do ensaio realizado. Para simular o maciço terroso utilizou-se uma areia siltosa bem graduada, não plástica, com peso específico seco máximo de 19.4 kN/m³, um teor em água óptimo de 11.2% (ensaio Proctor modificado) e CBR de 30%. Nos ensaios de placa ($\phi=300$ mm) efectuados obteve-se um módulo de reacção de 125 MN/m³. No que se refere ao betão das lajes ensaiadas, obteve-se uma resistência média à compressão aos 28 dias variando de 41 a 52 MPa. Na Figura 19 apresenta-se, para as duas séries de ensaios realizados, as curvas força-deslocamento medido num transdutor de deslocamentos disposto junto à área de aplicação da carga (centro da laje).

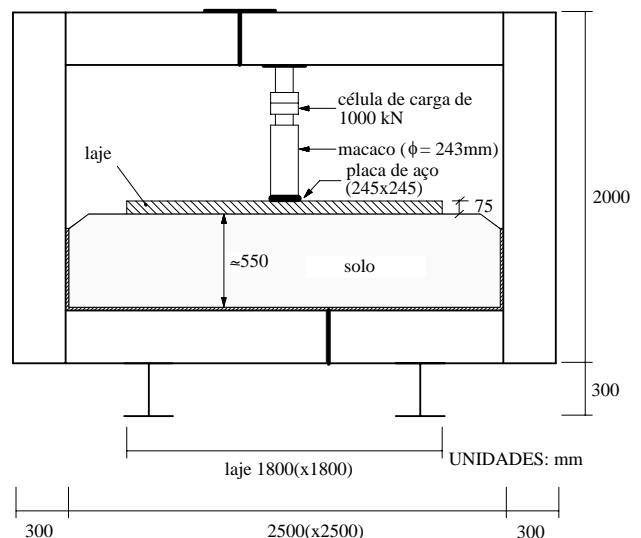


Figura 18 - Esquema do ensaio realizado com lajes apoiadas em solo.

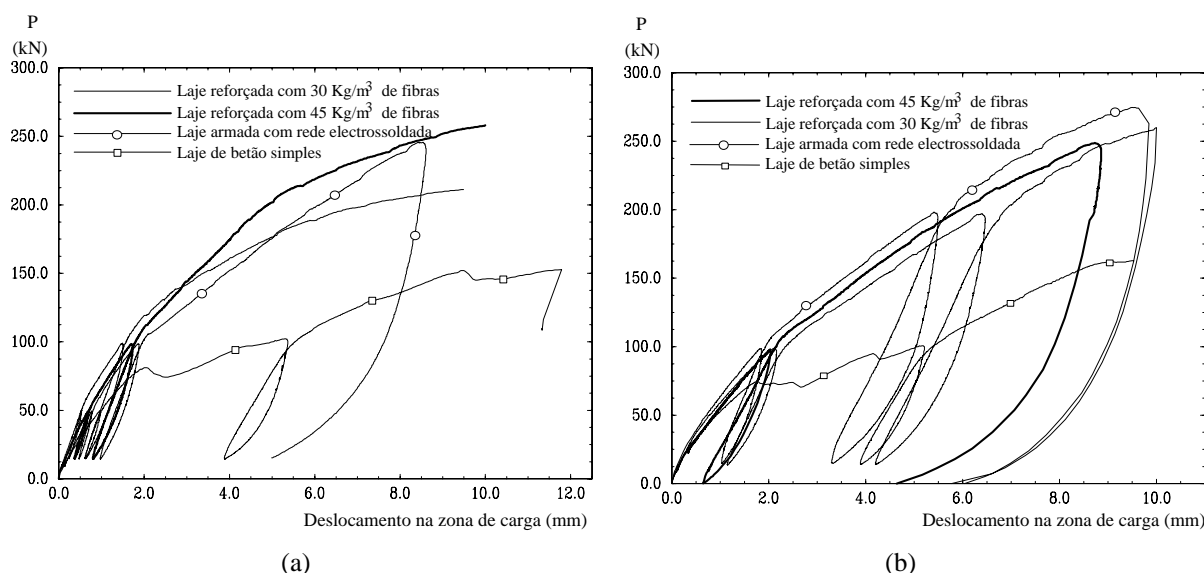


Figura 19 - Curvas força-deslocamento medido num transdutor de deslocamentos disposto junto à área de aplicação da carga, relativas à primeira (a) e segunda (b) série de ensaios de lajes apoiadas em solo.

Tomando-se a média da capacidade de carga registada nas duas séries de ensaios conclui-se que, relativamente à capacidade de carga apresentada pelas lajes de betão simples (*BS*), as lajes reforçadas com 30 e 45 Kg/m³ de fibras e as lajes armadas com rede electrossoldada desenvolveram uma capacidade de carga 49%, 60% e 64% superior, respectivamente. Deve-se ter ainda em conta que nas lajes de *BRFA* não foi alcançada a capacidade de carga última, principalmente nas lajes reforçadas com 45 Kg/m³. É assim de prever que as percentagens relativas às lajes de *BRFA* sejam, na realidade, um pouco superiores às referidas anteriormente, pelo que as lajes reforçadas com 45 Kg/m³ de fibras devem ter uma capacidade de carga última idêntica à das lajes armadas com rede electrossoldada.

Saliente-se que as lajes de *BRFA* apresentam a mesma capacidade resistente, tanto para acções que lhes induzem tracções na face inferior como para acções que lhes produzem tracções na face superior, o mesmo não acontecendo nas lajes armadas numa face. Assim, e dado que nos pavimentos industriais desenvolvem-se, geralmente, momentos positivos e negativos será necessário dispor de armaduras em ambas as faces, o que encarece a solução.

Da análise dos modos de rotura ocorridos nas lajes ensaiadas verificou-se que o comportamento em fendilhação é também consideravelmente melhorado com a utilização de *BRFA* dado que desenvolveu-se maior número de fendas mas de menor abertura [6], o que permite aumentar a resistência aos estados limites de utilização por abertura de fenda. Esta propriedade pode ser utilizada na diminuição do número de juntas de controlo da fendilhação por retracção nos pavimentos.

O comportamento das lajes de *BRFA* foi bastante mais dúctil do que o das lajes de *BS*, tendo estas últimas rompido por punçoamento, enquanto as primeiras desenvolveram elevada capacidade deformacional, acompanhada pelo surgimento de fendilhação dispersa. Apesar das lajes de *BRFA* não terem sido levadas à sua completa rotura, o comportamento evidenciado pronuncia uma rotura mais dúctil do que a ocorrida nas lajes armadas ensaiadas.

5 - APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

No Quadro 3 apresenta-se as principais aplicações de *BRFA* e os principais atributos que justificam o seu uso.

Quadro 3 - Aplicações de *BRFA* [6].

Área de aplicação	Produto	Atributos
Pavimentos	Pavimentos de edifícios industriais; auto-estradas; pistas de aeroportos; estações de abastecimento de combustíveis; piscinas; <i>courts</i> de ténis.	Aumento da resistência às acções de fadiga e impacto; aumento da resistência à tracção em flexão, o que permite diminuir a espessura dos pavimentos ou aumentar a sua vida útil; diminuir o número de juntas devido à maior resistência à tracção, à maior capacidade de absorção de energia e ao melhor controlo da fendilhação.
Estruturas hidráulicas	Barragens; canais; condutas; pilares submersos; estruturas offshore; elementos de dissipação de energia das ondas dos mares.	Maior resistência à cavitação, erosão e impacto.
Estruturas de betão projectado	Estabilização de taludes rochosos; estruturas subterrâneas; reparação e reabilitação de estruturas; construção de cascas delgadas; reservatórios.	Economia de mão-de-obra e material; menor tempo de execução; execução de peças de geometria complexa; aumento da qualidade do reforço.
Estruturas de betão refractário	Portas e paredes de fornos; compartimentos submetidos a gradientes térmicos elevados.	Maior resistência às tensões de origem térmica, ao choque térmico e às acções térmicas cíclicas.
Elementos préfabricados	Coberturas; canalizações; depósitos; fundações e estruturas de suporte de máquinas; lajes; muros de cerca ou vedação; varandas.	Facilidade de colocação em obra e de substituição; qualidade do acabamento; propriedades mecânicas; economia.
Componentes estruturais	Nós de ligação viga-pilar; consolas curtas; vigas de betão de resistência elevada; zonas de amarração de cabos de pré-esforço; estruturas offshore; portas resistentes a acções explosivas; elementos estruturais em regiões de intensidade sísmica considerável; componentes estruturais de instalações da indústria de energia nuclear.	Diminuição do congestionamento de armaduras convencionais; decréscimo do espaçamento e abertura das fendas; aumento da ductilidade do modo de rotura; maior resistência às acções cíclicas e de impacto.
Reparação e reforço de estruturas	Grande diversidade de elementos estruturais.	Economia de tempo, de mão-de-obra e de material.

6 - CONCLUSÕES

Comparativamente com composições de betão convencional, as dos betões reforçados com fibras de aço (*BRFA*) são caracterizadas por uma maior percentagem de inertes finos e de cimento. A composição deve ser ajustada à estrutura a fabricar e à técnica de aplicação a usar. A percentagem e a esbelteza das fibras (razão comprimento-diâmetro da fibra) e o tamanho dos inertes graúdos devem ser seleccionados de forma a evitar a aglomeração das fibras. Quanto mais resistente for a matriz menos esbeltas terão de ser as fibras, de forma a evitar a rotura destas no início da fendilhação da matriz. O tempo de amassadura deve ser o necessário para promover a dispersão homogénea das fibras. Na compactação do *BRFA* deve-se evitar a vibração interna, dado que esta promove a aglomeração das fibras. A avaliação da trabalhabilidade da mistura deve ser efectuada por intermédio de ensaios que determinem o tempo de fluidez da mistura sob vibração.

Na maior parte dos elementos estruturais constituídos por BRFA, a distribuição das fibras não é homogênea. Assim, para caracterizar devidamente o comportamento deste compósito por intermédio de ensaios em provetes é necessário que estes sejam materialmente semelhantes às zonas em que ocorre a rotura das estruturas em análise e que sejam submetidos a solicitações idênticas às que ocorrem nessas zonas da estrutura.

O ensaio de tracção uniaxial é o que melhor permite caracterizar os benefícios proporcionados pela adição de fibras a um material de matriz cimentícia. O aumento significativo da capacidade de absorção de energia que se verifica com o aumento da percentagem e esbelteza das fibras, não permite, contudo, aumentos similares em termos de resistência da estrutura. Todavia, em certas aplicações a participação das fibras permite substituir, pelo menos parcialmente, as armaduras convencionais.

Por intermédio de ensaios com lajes apoiadas em solo verificou-se que as fibras podem substituir as armaduras convencionais neste tipo de aplicação. A inclusão de fibras em faixas de laje reforçadas com rede electrossoldada permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga destes elementos estruturais e diminuir consideravelmente o espaçamento e abertura das fendas. Os resultados obtidos nestes ensaios revelam que a capacidade de carga, a ductilidade, o controlo da fendilhação e a segurança de estruturas laminares pré-fabricadas com betão de resistência elevada e reforçadas com armaduras de resistência elevada podem ser significativamente aumentados por intermédio da adição de fibras de aço.

Os ensaios efectuados com vigas revelaram que quanto mais resistente for o betão mais eficazes são as fibras como reforço ao esforço transversal. Assim, a utilização de fibras de aço no reforço de vigas de betão de resistência elevada e reforçadas com armaduras longitudinais de resistência elevada é um campo a ser explorado, dado se poder esgotar a capacidade resistente do betão e das armaduras convencionais, sem perigo de ocorrer uma rotura frágil. Será contudo necessário avaliar os custos associados a estas soluções.

REFERÊNCIAS

- [1] - “State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete”, Reported by *ACI Committee 544*, 1R-82, 1982, 22 pages.
- [2] - Ramakrishnan, V.; Oberling, G.; Tatnall, P., “Flexural Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete”, *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105*, *ACI*, 1987, pp. 225-245.
- [3] - Balaguru, P.N.; Shah, S.P., “Fiber Reinforced Cement Composites”, *McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series*, 1992, 530 pages.
- [4] - Ramakrishnan, V.; Coyle, W.V.; Dahl, L.F.; Shrader, E.K., “A Comparative Evaluation of Fiber Shotcrete”, *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 3, Nº 1, 1981, pp. 56-59.
- [5] - Wu, G. Y.; Shivaraj, S. K.; Ramakrishnan, V., “Flexural Fatigue Strength, Endurance Limit, and Impact Strength of Fiber Reinforced Refractory Concretes”, *Fiber Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments*, Elsevier, New York, 1989, pp. 261-273.
- [6] - Barros, J.A.O., “Comportamento do Betão Reforçado com Fibras, Análise Experimental e Simulação Numérica”, *Tese de Doutoramento*, FEUP, Dezembro 1995.
- [7] - Nanni, A.; Johari, A., “RCC Pavement Reinforced with Steel Fibers”, *Concrete International*, March 1989, pp. 64-69.
- [8] - Tatnall, P.C.; Kuitenbrouwer, L., “Steel Fiber Reinforced Concrete in Industrial Floors”, *Concrete International*, December 1992, pp. 43-47.

- [9] - Vandewalle, M., "Tunnelling the World", *N. V. Bekaert S.A.*, 1990, 218 pages.
- [10] - Casanova, P., "Bétons Renforcés de Fibres Métalliques, du Matériau à la Structure", *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, Février 1996.
- [11] - Jindal, R.L.; Sharma, V., "Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Knee-Type Beam-Column Connections", *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105, ACI*, Detroit, Michigan, 1987, pp. 475-492.
- [12] - Sood, V.; Gupta, S., "Behavior of Steel Fibrous Concrete Beam-Column Connections", *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105, ACI*, Detroit, Michigan, 1987, pp. 437-474.
- [13] - Rossi, P.; Renwez, S.; Guerrier, F., "Les bétons fibrés à ultra-hautes performances. L'expérience actuelle du LCPC", *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N° 204, Réf. 4025, Juillet-Aout 1996, pp. 87-95.
- [14] - "Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Reinforced Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 90, N° 1, January-February 1993.
- [15] - "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", *ACI Committee 544, Fiber Reinforced Concrete, SP 81*, Detroit, MI, 1994, pp. 433-439.
- [16] - Coutinho, A.S., "Fabrico e Propriedades do Betão", *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, 2 volumes, 1988.
- [17] - "Concrete and Aggregates", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, 824 pages, 1991.
- [18] - Iyengar, K.T.S.R.; Nagaraj, T.S.; Rao, B.K., "Superplasticized Natural Rubber Latex Modified Steel Fibre Reinforced Concretes", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Volume 1, paper 3.3, 1986.
- [19] - El-Refai, F.E.; Morsy, E.H., "Some Properties of Fibre Reinforced Concrete with Superplasticizer", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Volume 1, paper 3.2, 1986.
- [20] - Narayanan, R.; Palangian, A.S.K., "Factors Influencing the Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Volume 1, paper 3.1, 1986.
- [21] - Barros, J.A.O.; Figueiras, J.A., "*Barros, J.A.O., Figueiras, J.A. (1995c)*, 'Modelo para Estruturas de Betão Fendilhado Reforçado com Fibras de Aço', *XVI CILAMCE*, Brasil, Novembro 1995.
- [22] - "Design Code", *CEB-FIP Model Code*, Bulletin d'information N° 203-205, 1990.
- [23] - Al-Ta'an, S.A.; Al-Feel, J.R., "Evaluation of Shear Strength of Fibre-Reinforced Concrete Beams", *Cement & Concrete Composites*, N° 12, 1990, pp. 87-94.
- [24] - Tan, K.H.; Murugappan, K.; Paramasivam, P., "Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 89, N° 6, November-December 1992, pp. 3-11.
- [25] - Swamy, R.N.; Jones, R.; Chiam, A.T.P., "Influence of Steel Fibers on the Shear Resistance of Lightweight Concrete I-Beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 90, N° 1, January-February 1993, pp. 103-114.
- [26] - Swamy, R.N.; Al-Ta'an S.A., "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams Made with Steel Fiber Concrete", *ACI Journal*, September-October 1981, pp. 395-405.